

طراحی کنترل کننده بهینه تطبیقی جهت تنظیم زاویه پیچ پرها در توربین بادی سرعت متغیر

محمود دهقان^۱، سید اسماعیل میرعبداللهی^۲

۱- دانشگاه آزاد اسلامی واحد ابرکوه، ابرکوه، ایران

۲- دانشگاه آزاد اسلامی واحد ابرکوه، ابرکوه، ایران

چکیده- به طور کلی در این مقاله به طراحی یک کنترل کننده بهینه تطبیقی مدل مرجع(OMRAC) برای کنترل زاویه شیب پره‌های یک توربین بادی سرعت متغیر پرداخته می‌شود. هدف اصلی این پژوهش تنظیم زاویه پیچ پره‌های دوار توربین به کمک تکنیک کنترل تطبیقی بهینه و به منظور کنترل سرعت ژنراتور جهت ثابت نمودن توان خروجی در برابر سرعت‌های متغیر باد می‌باشد. در این مقاله ابتدا یک مدل دینامیکی از یک توربین با سرعت و زاویه پیچ متغیر ارائه می‌شود که از این مدل برای شبیه‌سازی توربین و طراحی قانون کنترل زاویه پیچ استفاده خواهد شد. هدف کنترلی نیز تثبیت سرعت چرخشی روتور توربین در برابر سرعت‌های بالاتر از حد مجاز باد می‌باشد. طراحی کنترل کننده تطبیقی به کمک قانون MIT و بهینه‌سازی سیستم کنترلی به کمک الگوریتم ژنتیک صورت می‌گیرد. جهت اثبات کارایی کنترل کننده پیشنهادی نیز عملکرد آن با یک کنترل کننده PI مقایسه خواهد شد. نتایج شبیه‌سازی در انتهای مقاله عملکرد مناسب کنترل کننده پیشنهادی را نشان خواهد داد.

کلید واژه- توربین بادی سرعت متغیر، زاویه پیچ، کنترل تطبیقی مدل مرجع، قانون MIT، الگوریتم ژنتیک

۱- مقدمه

و نامعینی‌های شدیدی که برای این گونه توربین های بادی وجود دارند نمی‌توان عملکرد بهینه و ممتازی را از این استراتژی های کنترلی انتظار داشت. بنابراین باید به سراغ تکنیک‌های کنترلی کارآمد دیگر مانند تکنیک‌های تطبیقی و هوشمند رفت [۹ و ۱۰]. در این مقاله از یک ساختار کنترل تطبیقی مدل مرجع که قوانین تطبیق آن به کمک قانون MIT طراحی می‌شوند استفاده خواهد شد [۱۱]. به منظور افزایش بازدهی سیستم کنترلی و بهبود عملکرد آن، از الگوریتم ژنتیک برای تنظیم برخی ضرایب کنترل کننده استفاده شده است [۱۲]. چرا که این الگوریتم بواسطه برخی قابلیت‌های منحصر بفرد خود از جمله توانایی حل بهینه مسائل با غیر خطی زیاد که به نوعی نمایش دهنده سیستم‌های مهندسی پیچیده هستند، جایگاه ویژه‌ای را در میان الگوریتم های بهینه سازی دارد [۱۳]. زمانی که سرعت باد از محدوده مجاز خود تجاوز نماید زاویه پیچ پره‌های توربین بادی باید به گونه ای تنظیم شوند (دارای زاویه‌ای باشند) که از تجاوز توان و بیشتر شدن سرعت روتور از حد مجاز جلوگیری نماید. در غیر این صورت باعث بروز برخی مشکلات مانند کاهش شدید راندمان و احتمال آسیب دیدن توربین و... خواهد

امروزه توربین‌های بادی با سرعت و زاویه پیچ متغیر مورد استفاده فراوان قرار گرفته اند [۱ و ۲]. سیستم توربین با سرعت و زاویه پیچ متغیر دارای برخی مشخصات غیر خطی شدیدی می باشد که فرایند طراحی قانون کنترل برای چنین سیستمی را نسبتاً دشوار می‌کند [۳]. کنترل کننده PID و یا PI به طور چشمگیری به منظور کنترل سرعت و توان خروجی این توربین- های بادی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۴]. اما این کنترل کننده، در حالت ساده نمی‌تواند یک عملکرد بهینه، ممتاز و مقاومی را برای توربین بادی ایجاد نماید. بررسی مقالات و پژوهش های گوناگون گویای این حقیقت است که کنترل کننده‌های خطی به طور وسیعی برای کنترل توان این سیستم‌ها از طریق کنترل زاویه پیچ پره‌های توربین مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۵]. از جمله روش های کنترلی LQR و یا LQG نیز در این میان بسیار به چشم می‌خورد [۶ و ۷ و ۸]. به هر حال با وجود مزایایی مختلفی که برای چنین کنترل کننده های وجود دارد، اما در برابر غیرخطی‌ها

پارامتر	تعریف
J_r	اینرسی روتور
J_{gen}	اینرسی ژنراتور
K_r	ضریب دمپینگ خارجی رتور
K_{gen}	ضریب دمپینگ خارجی ژنراتور
K_d	ضریب دمپینگ شفت سرعت پایین
ω_r	سرعت روتور
ω_{gen}	سرعت ژنراتور
T_r	گشتاور روتور (آرئودینامیکی)
T_{gen}	گشتاور ژنراتور
T_{shaft}	گشتاور شفت سرعت- پایین

عبارت گشتاور آرئودینامیکی T_r به صورت رابطه (۱) خواهد بود.

$$T_r = \frac{1}{2} \frac{\pi \rho R^2 C_p(\lambda, \beta)}{\lambda} V^2 \quad (1)$$

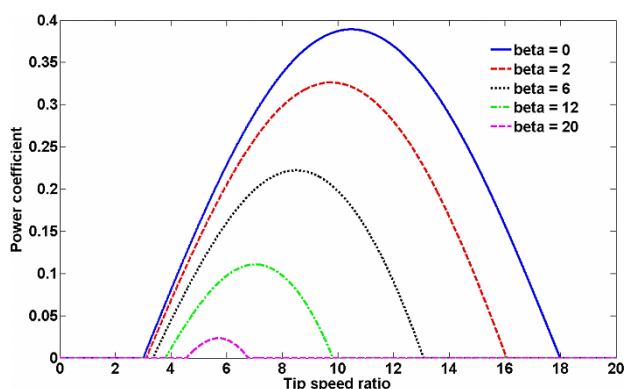
که در این معادله، $\lambda = \omega_r R / V$ نسبت سرعت نوک (Tip Speed Ratio) نامیده می‌شود. همچنین R شعاع روتور و C_p ثابت توان می‌باشد. در این مدل سازی ما چند تقریب را در نظر می‌گیریم. معادله‌ای که در این جا برای ثابت توان C_p استفاده می‌کنیم به صورت معادله (۲) می‌باشد.

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.22 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\frac{22.5}{\lambda_i}} \quad (2)$$

که در معادله (۲) برای λ می‌توان نوشت:

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (3)$$

در شکل (۲) منحنی مشخصه $C_p - \lambda$ به ازای زوایای پیچ (β) مختلف نشان داده شده است.



شکل ۲- مشخصه $C_p - \lambda$ به ازای زوایای پیچ مختلف

نمودار نشان دهنده ارتباط میان سرعت روتور و خروجی توان توربین نیز در شکل (۳) نشان داده شده است.

شد [۱۴]. لذا در این پژوهش از یک کنترل کننده تطبیقی بهینه مدل مرجع مبتنی بر قانون MIT به منظور تنظیم زاویه پیچ پره ها در سرعت‌های با رنج مختلف باد استفاده می‌شود. در حقیقت کنترل کننده پیشنهادی، با دریافت فیدبک از سرعت روتور توربین سعی می‌کند که علی‌رغم تغییرات سرعت باد، همچنان در یک مقدار مطلوب، ثابت نگه دارد. این مقاله به صورت زیر سازماندهی شده است.

در بخش (۲) به مدل سازی ریاضی یک توربین بادی سرعت متغیر خواهیم پرداخت. بخش (۳) نیز منحنی توان ایده آل برای توربین بادی مورد بررسی قرار خواهد داد. در بخش (۴) ما روش کنترلی پیشنهادی خود را ارائه خواهیم نمود. در بخش (۵) فرایند بهینه سازی به کمک الگوریتم ژنتیک بیان خواهد شد. در بخش (۶) نیز نتایج شبیه سازی برای نمایش عملکرد روش فوق ارائه می‌شوند.

۲- مدل سازی توربین بادی

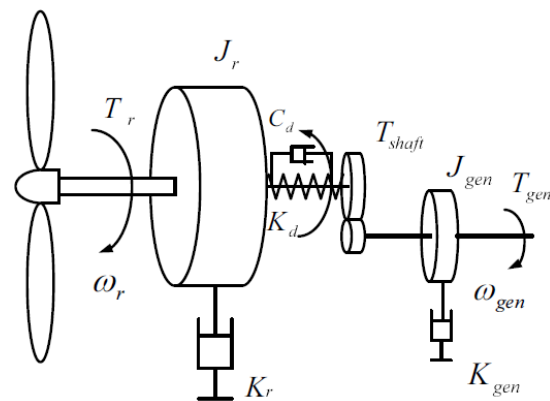
این موضوع کاملاً بدیهی است که استخراج توان از یک توربین بادی تابعی از برخی پارامترهای اساسی و مهم می‌باشد:

۱- سرعت باد

۲- سرعت روتور توربین بادی

۳- زاویه پیچ پره‌های توربین

شکل (۱) مدل یک توربین بادی را نشان می‌دهد.

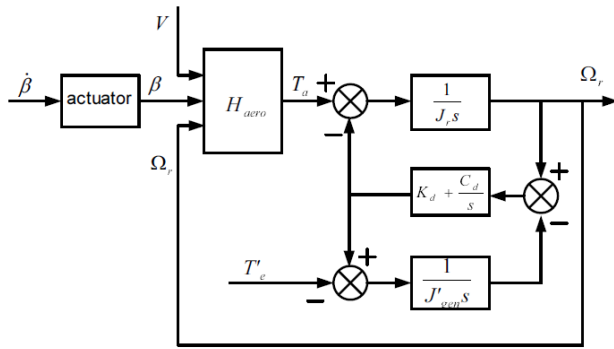


شکل ۱- مدل یک توربین بادی

پارامترهای موجود در مدل (۱) به همراه تعریف آنها در جدول (۱) قرار داده شده است.

جدول ۱- پارامترهای توربین بادی سرعت متغیر

پارامتر	تعریف
β	زاویه پیچ پره ها بر حسب درجه
C_p	ثابت توان
C_d	ثابت شفت سرعت پایین

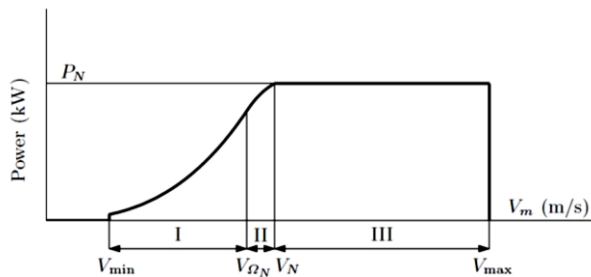


شکل ۴- مدل توربین بادی در حوزه S

سلسله محرک توسط کوپلینگ های الاستیک از روتور سخت توربین و روتور ژنراتور با مشخصه های ژنراتور مربوط به شفت توربین مشخص شده است. نسبت تبدیل جعبه دنده نیز شامل پارامترهای مقیاس بندی شده بر روی گشتاور و سرعت در بخش ژنراتور می شود.

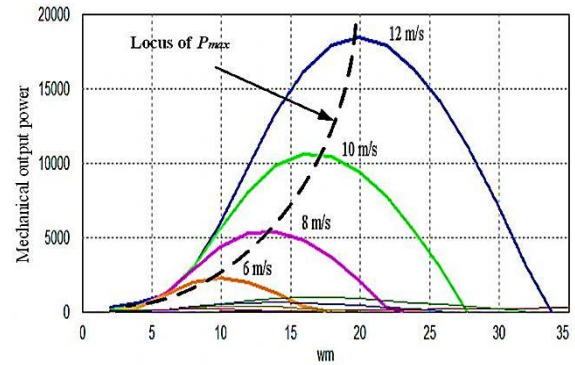
۳- منحنی توان ایده آل برای یک توربین بادی

منحنی توان ایده آل برای یک توربین بادی در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل ۵- منحنی توان ایده آل برای یک توربین بادی

محور عمودی این نمودار، توان و محور افقی آن، سرعت باد بر حسب متر بر ثانیه (m/s) می باشد. همانطور که در شکل نشان داده شده است برای یک توربین بادی سه ناحیه عملکردی را می توان در نظر گرفت. برای سرعت های پایین تر از حد مجاز، توربین بیشترین توان قابل دسترسی را در جریان باد جذب می کند. این ناحیه با شماره I در شکل (۵) نشان داده شده است. در این ناحیه زاویه پیچ ثابت بوده و سرعت بهینه روتور از طریق کنترل گشتاور ژنراتور تعیین می شود. در ناحیه III توربین باید در یک توان مجاز ثابت کار کند. در این ناحیه توان بادی بیشتری از حد مجاز برای توربین وجود دارد. بنابراین توربین بادی دارای راندمان پایینی خواهد بود (کمتر از $C_p \max$). در این ناحیه گشتاور ژنراتور در یک مقدار ماکزیمم مجاز ثابت بوده و از طریق کنترل زاویه پیچ می توان سرعت روتور را کنترل



شکل ۳- ارتباط میان سرعت روتور و توان خروجی توربین

پاسخ دینامیکی روتور در یک سرعت ویا توسط گشتاور آئرو دینامیکی T_r می تواند به صورت (۴) نمایش داده شود:

$$J_r \dot{\omega}_r = T_r - T_{shaft} - K_r \omega_r \quad (4)$$

گشتاور شفت سرعت- پایین (T_{shaft}) بر روی روتور توربین نقش یک گشتاور ترمزی را دارد.

این موضوع، از پیچش ها و اصطکاک های بواسطه اختلاف میان ω_r و ω'_{gen} نتیجه می گیرد.

$$T_{ls} = C_d (\theta_r - \theta'_{gen}) + K_d (\omega_r - \omega'_{gen}) \quad (5)$$

سرعت ژنراتور نیز از گشتاور شفت سرعت - بالا T_{shaft} گرفته شده است و توسط گشتاور الکترومغناطیس ژنراتور T_{gen} ترمز می شود.

$$J'_{gen} \dot{\omega}'_{gen} = T_{shaft} - T'_{gen} - K'_{gen} \omega'_{gen} \quad (6)$$

که:

$$\theta'_{gen} = n \theta_{gen}, \quad \omega'_{gen} = n \omega_{gen}, \quad (7)$$

$$T'_{gen} = n^2 T_{gen}, \quad K'_{gen} = n^2 K_{gen}$$

n نیز نسبت تبدیل جعبه دنده توربین بادی می باشد.

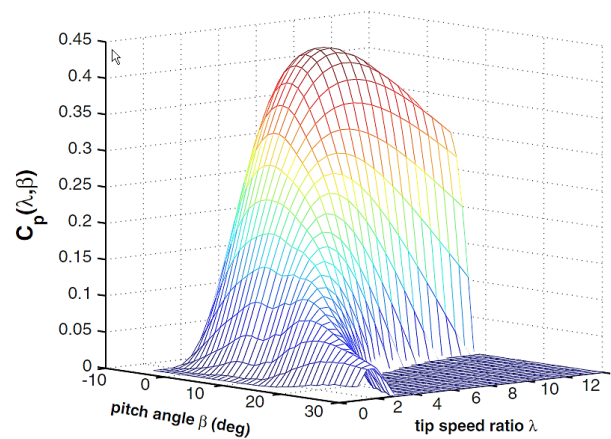
به طور کلی برای کنترل زاویه پیچ پره های توربین دو محرکه وجود دارد: محرکه های الکتریکی و محرکه های هیدرولیکی.

هر دوی این محرکه ها می توانند به صورتی یک تابع تبدیل مرتبه دو و به فرم (۸) مدل شوند.

$$Act(s) = \frac{k}{s(\tau s + 1)} \quad (8)$$

شکل (۴) مدل توربین را در حوزه S نشان می دهد.

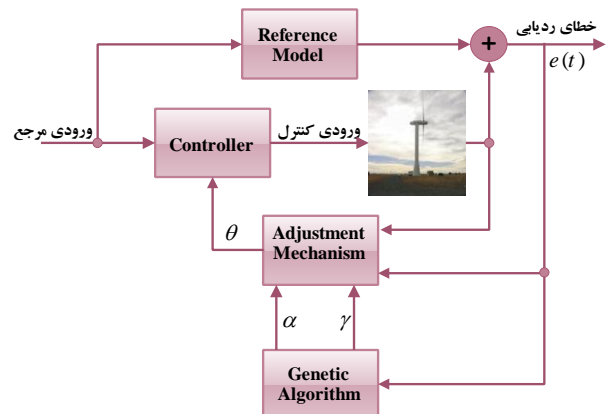
نمود. در شکل (۶) می توان ارتباط $C_p(\beta, \lambda)$ را به صورت کامل مشاهده نمود.



شکل ۶- ارتباط $C_p(\beta, \lambda)$ به صورت کامل

۴- استراتژی کنترلی پیشنهادی

در این مقاله به منظور دستیابی به هدف کنترلی و رسیدن به یک پاسخ مناسب از یک کنترل کننده تطبیقی بهینه مدل مرجع و مبتنی بر قانون MIT استفاده می شود. ساختار سیستم کنترلی به صورت شکل (۷) می باشد. این تکنیک کنترل تطبیقی در زیر مجموعه کنترل تطبیقی Non-Dual قرار می گیرد. کنترل کننده تطبیقی به گونه ای طراحی می شود که سیستم تحت کنترل (توربین بادی) را وادار نماید تا رفتاری مشابه با مدل مرجع داشته باشد. خروجی مدل مرجع با خروجی واقعی مقایسه شده و این اختلاف برای تنظیم پارامترهای کنترل فیدبک استفاده می شود. به منظور بهینه سازی عملکرد کنترل کننده نیز از یک حلقه بهینه سازی (الگوریتم ژنتیک) برای بهینه کردن برخی پارامترهای مکانیزم تطبیق استفاده شده است.



شکل ۷- ساختار پیشنهادی کنترل کننده تطبیقی مدل مرجع بهینه برای توربین بادی سرعت متغیر

سازی به کمک الگوریتم ژنتیک می باشد. حلقه داخلی یا حلقه تنظیم کننده که یک حلقه کنترلی معمولی بوده و شامل توربین و کنترل کننده می باشد. همچنین حلقه میانی یا حلقه تطبیق که پارامترهای کنترل کننده را به گونه تنظیم می کند که خطای میان خروجی مدل و خروجی واقعی (توربین بادی) در کوتاه ترین زمان ممکن به سمت صفر میل کند. حلقه خارجی نیز مربوط به حلقه بهینه سازی توسط الگوریتم ژنتیک است. اجزای ساختاری کنترل کننده تطبیقی مدل مرجع مبتنی بر قانون MIT به صورت زیر می باشد:

مدل مرجع: این مدل برای تعیین پاسخ سیستم کنترل تطبیقی به فرمان های ورودی استفاده می شود. این ساختار باید خصوصیات عملکردی متناسب با اهداف کنترلی را بازتاب کند. نکته ای که در این قسمت بسیار مهم می باشد این است که رفتار ایده آل تعیین شده توسط مدل مرجع باید برای سیستم کنترل تطبیقی قابل دستیابی باشد.

کنترل کننده: این ساختار اغلب توسط تعدادی پارامتر قابل تنظیم (θ_i) تعریف می شود. قانون کنترل نیز نسبت به پارامترهای قابل تنظیم خطی می باشد. طراحی کنترل تطبیقی به طور معمول به پارامتر بندی خطی جهت بدست آوردن مکانیزم تطبیق به همراه تضمین پایداری و همگرایی تعقیب نیاز دارد.

مکانیزم تطبیق: این مکانیزم برای تنظیم پارامترها در قانون کنترل استفاده می شود. قانون تطبیق پارامترهایی را جستجو می کند که باعث شوند رفتار سیستم تحت کنترل شبیه به پاسخ مدل مرجع شود. هدف این زیر مجموعه علاوه بر پایداری سیستم کنترلی، همگرایی خطای تعقیب به سمت صفر در کوتاه ترین زمان ممکن می باشد. تکنیک های ریاضی مانند قانون MIT، تئوری لیاپانف و تئوری خطای افزایشی می توانند برای پیاده سازی مکانیزم تطبیق بکار برده شوند. در این مقاله از قانون MIT به همین منظور استفاده خواهد شد.

قانون MIT: این قانون اولین بار در انستیتوی فناوری MIT طراحی و جهت اعمال به سیستم های کنترلی تطبیق مدل مرجع در مسائل عملی مانند سیستم اتوپیلوت در هواپیماها بکار برده شد. در بخش مربوطه به طور کامل بیان خواهد شد.

الگوریتم ژنتیک: این الگوریتم جهت بهینه سازی برخی پارامترهای مکانیزم تطبیق مورد استفاده قرار گرفته است. در قانون MIT، یک تابع هزینه به صورت (۹) تعریف می شود:

$$J(\theta) = \frac{1}{2} e(t)^2 \quad (9)$$

که $e(t)$ خطای بین خروجی سیستم تحت کنترل و مدل مرجع می باشد. پارامتر θ نیز پارامتر قابل تنظیم توسط مکانیزم تطبیق

می باشد.

پارامتر θ باید به گونه ای تنظیم گردد که تابع هزینه $J(\theta)$ می نیمم شده و به سمت صفر میل کند. بنابراین تغییرات پارامتر θ باید در جهت گرادیان منفی تابع هزینه $J(\theta)$ باشد یعنی:

$$\frac{d\theta}{dt} = -\gamma \frac{\partial J}{\partial \theta} \quad (10)$$

و بنابراین با توجه به معادلات (9) و (10)، خواهیم داشت:

$$\frac{d\theta}{dt} = -\gamma e \frac{\partial e}{\partial \theta} \quad (11)$$

عبارت مشتق جزئی $\frac{\partial e}{\partial \theta}$ در حقیقت، مشتق حساسیت سیستم نامیده می شود. این عبارت نشان می دهد که خطا نسبت به پارامتر θ در حال تغییر می باشد. معادله $\frac{d\theta}{dt} = -\gamma \frac{\partial J}{\partial \theta}$ بیان می کند که تغییرات در پارامتر θ نسبت به زمان می تواند باعث کاهش تابع هزینه $J(\theta)$ به سمت صفر گردد. در اینجا پارامتر γ یک مقدار مثبت بوده که گین تطبیق کنترل کننده را تعیین می کند.

کنترل کننده طراحی شده فوق با استفاده از قانون MIT نتایج قابل قبولی خواهد داشت اما متأسفانه عملکرد آن به دامنه سیگنال ورودی مدل مرجع وابسته می باشد. به طوری که برای دامنه های بزرگ ورودی مرجع ممکن است سیستم ناپایدار گردد. از این رو برای از بین بردن این عیب، الگوریتم نرمالیزه شده به همراه قانون MIT استفاده می شود تا قانون کنترل تکمیل گردد. الگوریتم نرمالیزه شده، قانون تطبیق MIT را به صورت (12) اصلاح می کند.

$$\frac{d\theta}{dt} = -\gamma e(t, \theta) \cdot \frac{\phi}{\alpha + \phi' \phi} \quad (12)$$

که در قانون تطبیق فوق پارامتر ϕ به صورت (13) تعریف می شود.

$$\phi = \frac{\partial}{\partial \theta} e(t, \theta), \quad \alpha > 0 \quad (13)$$

پارامتر α نیز به منظور حذف مشکل تقسیم شدن بر صفر پارامتر ϕ در زمانی که ϕ خیلی کوچک می باشد، استفاده شده است. این دو پارامتر نقش فراوانی را در برخی مشخصات عملکردی سیستم کنترلی ایفا می کنند. بنابراین برای تنظیم این دو پارامتر از روش بهینه سازی استفاده می کنیم.

۵- بهینه سازی به کمک الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک یک تکنیک بهینه سازی جستجوی تطبیقی سراسری و تصادفی است که بر اساس مکانیزم انتخاب اصلح عمل

می کند. اخیراً این الگوریتم به عنوان یک روش موثر و کارآمد برای حل مسائل پیچیده بهینه سازی شناخته شده است. این الگوریتم با یک جمعیت اولیه، شامل تعدادی کروموزوم که در آن هر یک نشان دهنده راه حل مسئله است شروع شده و عملکرد آن توسط یک تابع ارزیابی می شود. در واقع، این الگوریتم شامل سه مرحله اصلی: انتخاب، آمیزش و جهش می باشد. استفاده از این سه عملیات اساسی اجازه می دهد تا نسل جدیدی که ممکن است بهتر از پدر و مادر خود باشد ایجاد شود. این الگوریتم برای بسیاری از نسل ها تکرار شده و در نهایت هنگامی که به شرایطی برسد که نشان دهنده حل بهینه مسئله باشد متوقف خواهد شد. در این مقاله، تابع ارزیابی برای این الگوریتم را به صورت زیر انتخاب می کنیم.

$$\text{Cost Function} = \int_0^T |e(\alpha, \gamma, t)| dt, \quad (14)$$

T : simulation time

۶- نتایج شبیه سازی

در ادامه نتایج شبیه سازی به منظور نشان دادن کارایی و عملکرد کنترل کننده پیشنهادی ارائه خواهد شد. تابع تبدیل مدل مرجع را به صورت یک تابع تبدیل مرتبه یک، بهره یک و ثابت زمانی 0.1 sec انتخاب می کنیم.

$$\frac{y_m}{u_c} = \frac{1}{0.1s + 1} \quad (15)$$

مشخصات در نظر گرفته شده برای الگوریتم ژنتیک نیز در جدول (۲) قرار داده شده است.

جدول ۲: مشخصات در نظر گرفته شده برای الگوریتم ژنتیک

مقدار	تعریف	پارامتر
20	اندازه جمعیت	Population size
10	طول کروموزوم	Chromosome Length
0.7	نرخ یا احتمال آمیزش	Crossover Probability
0.05	نرخ یا احتمال جهش	Mutation Probability

نتایج بدست آمده توسط الگوریتم ژنتیک نیز در جدول (۳) قرار داده شده است.

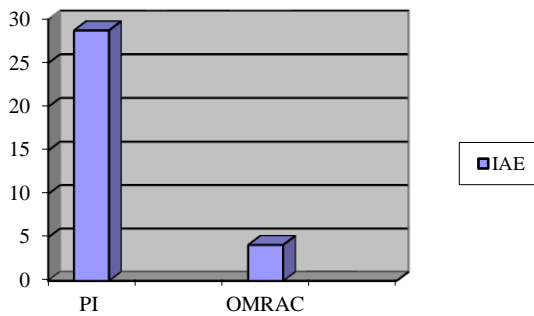
جدول ۳: مقادیر بهینه ضرایب مکانیزم تطبیق

ضریب	γ	α
مقدار	1.055	2.303

$$Cost Function (PI) = \int_0^{30} |e(t)| dt = 28.76$$

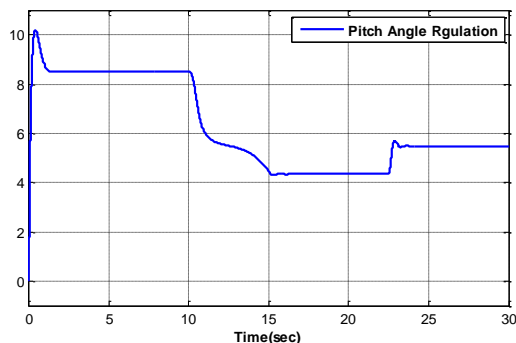
$$Cost Function (OMRAC) = \int_0^{30} |e(t)| dt = 4.134$$

نتایج عددی فوق نشان می‌دهد که نسبت خطای کنترل کننده پیشنهادی به کنترل کننده PI در حدود 0.14 می‌باشد. نمودار (۱۱) نتایج بدست آمده فوق را به صورت نموداری نشان می‌دهد.



شکل (۱۱): نمودار مقایسه عملکرد با توجه به معیار IAE

شکل (۱۲) تغییرات زاویه پیچ پره های توربین توسط کنترل کننده پیشنهادی به منظور تثبیت سرعت روتور توربین در برابر تغییرات سرعت باد را بر حسب درجه نشان می‌دهد.

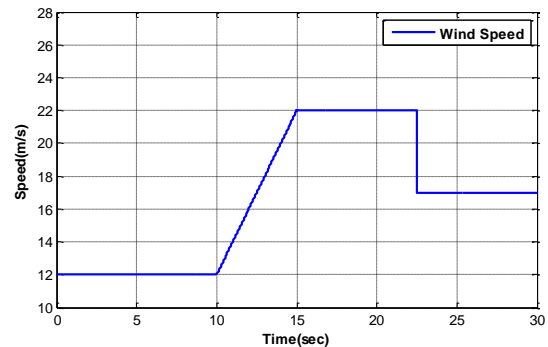


شکل ۱۲- تغییرات زاویه پیچ پره های توربین توسط کنترل کننده تطبیقی بهینه بر حسب درجه

نتیجه گیری

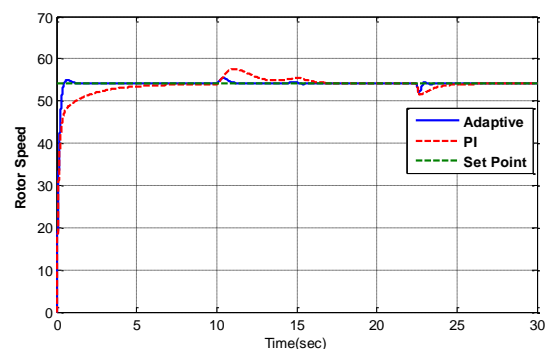
به طور کلی در این پژوهش به مدل سازی و کنترل یک توربین بادی سرعت متغیر پرداخته شد. به منظور کنترل زاویه پیچ پره های این توربین بادی در برابر سرعت های بیش از حد باد و به منظور تثبیت سرعت روتور توربین از کنترل کننده تطبیقی و بهینه مدل مرجع استفاده شد. طراحی قوانین تطبیق نیز به کمک قانون MIT صورت گرفته شد. به منظور نشان دادن عملکرد بهینه و مناسب کنترل کننده پیشنهادی نیز از یک کنترل کننده PI جهت مقایسه استفاده شد. نتایج شبیه سازی همگی عملکرد

شکل (۸) تغییرات پیوسته و همچنین ناگهانی سرعت باد را از محدوده مجاز (متوسط ۱۲ متر بر ثانیه) به محدوده بیش از حد مجاز (حدود ۱۵ و ۲۲ متر بر ثانیه) نشان می‌دهد.



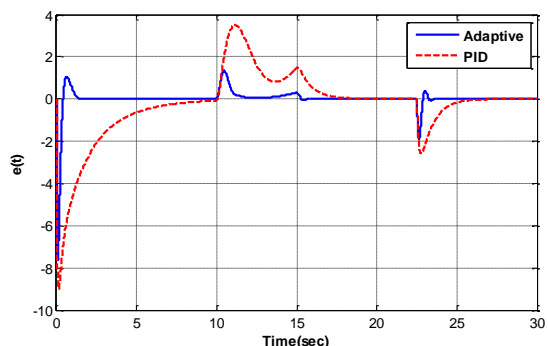
شکل ۸- تغییرات سرعت باد به صورت ناگهانی از حالت نرمال ۱۲ به محدوده بالاتر از حد مجاز ۲۰

در شکل (۹)، تثبیت سرعت روتور توربین توسط کنترل کننده پیشنهادی را علی رغم تغییرات ناگهانی سرعت باد، در مقدار مطلوب نشان می‌دهد.



شکل ۹- تنظیم سرعت روتور توربین در برابر تغییرات سرعت باد

خطای ردیابی ورودی مرجع نیز در شکل (۱۰) قرار داده شده است. ملاحظه می‌شود که کنترل کننده پیشنهادی نسبت به کنترل کننده PI دارای سرعت و دقت بیشتری می‌باشد.



شکل ۱۰- خطای تعقیب سرعت مرجع توسط روتور توربین در برابر تغییرات سرعت باد

به منظور ارائه نتایج عددی نیز تابع ارزیابی خطای تعقیب هر دو کنترل کننده (IAE) را نیز محاسبه نموده ایم.

دقیق و سریع کنترل کننده پیشنهادی را در برابر تغییرات ناگهانی سرعت باد نشان می دهند.

مراجع

- [8] Pinteau, A., Wang, H., Christov, N., Borne, P., Popescu, D., & Badea, A. (2011, June). Optimal control of variable speed wind turbines. In *Control & Automation (MED), 2011 19th Mediterranean Conference on* (pp. 838-843). IEEE.
- [9] Mullane, A., Lightbody, G., & Yacamini, R. (2001). Adaptive control of variable speed wind turbines. In *n proceedings of 36th Universities Power Engineering Conference, Swansea*.
- [10] Jafarnejadsani, H., Pieper, J., & Ehlers, J. (2012, October). Adaptive control of a variable-speed variable-pitch wind turbine using RBF neural network. In *Electrical Power and Energy Conference (EPEC), 2012 IEEE* (pp. 216-222). IEEE.
- [11] Amuthan, N. (2009, December). Direct model reference adaptive internal model controller for DFIG wind farms with dither injection. In *Power Systems, 2009. ICPS'09. International Conference on* (pp. 1-6). IEEE.
- [12] Gen, M., & Cheng, R. (2000). *Genetic algorithms and engineering optimization* (Vol. 7). John Wiley & Sons.
- [13] Panda, S., & Padhy, N. P. (2008). Comparison of particle swarm optimization and genetic algorithm for FACTS-based controller design. *Applied soft computing*, 8(4), 1418-1427.
- [14] Belghazi, O., & Cherkaoui, M. O. H. A. M. E. D. (2012). Pitch angle control for variable speed wind turbines using genetic algorithm controller. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 39(1), 6-10.
- [1] Belghazi, O., & Cherkaoui, M. O. H. A. M. E. D. (2012). Pitch angle control for variable speed wind turbines using genetic algorithm controller. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 39(1), 6-10.
- [2] Vidal, Y., Acho, L., Luo, N., Zapateiro, M., & Pozo, F. (2012). Power control design for variable-speed wind turbines. *Energies*, 5(8), 3033-3050.
- [3] Tang, C. Y., Guo, Y., & Jiang, J. N. (2011). Nonlinear dual-mode control of variable-speed wind turbines with doubly fed induction generators. *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, 19(4), 744-756.
- [4] Horiuchi, N., & Kawahito, T. (2001). Torque and power limitations of variable speed wind turbines using pitch control and generator power control. In *Power Engineering Society Summer Meeting, 2001* (Vol. 1, pp. 638-643). IEEE.
- [5] Leithead, W. E., & Connor, B. (2000). Control of variable speed wind turbines: design task. *International Journal of Control*, 73(13), 1189-1212.
- [6] Munteanu, I., Cutululis, N. A., Bratcu, A. I., & Ceangă, E. (2005). Optimization of variable speed wind power systems based on a LQG approach. *Control Engineering Practice*, 13(7), 903-912.
- [7] Stol, K., & Balas, M. (2001). Full-state feedback control of a variable-speed wind turbine: a comparison of periodic and constant gains. *Journal of solar energy engineering*, 123(4), 319-326.